第 40 卷　第 2 期　　天 文 学 进 展　　Vol. 40, No. 2
2022 年 6 月　　PROGRESS IN ASTRONOMY　　June., 2022

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2022.02.06

并合星系团 Abell 4067 中激波和冷锋性质研究

王　帅[1]，葛　翀[2]

(1. 北京师范大学 天文系，北京 100875； 2. 中国科学院 紫金山天文台，南京 210042)

摘要： 钱德拉 (Chandra) X 射线卫星对并合星系团 Abell 4067 进行了 1.3×10^{5} s 的观测，通过处理这些数据，对其内部的并合子结构进行了初步的分析。分析后发现，在星系团的东侧存在一个激波，距离东侧次星系团冷核中心 280 kpc，激波所造成的电子密度跳变比和温度跳变比分别是 $2.19^{+0.16}_{-0.09}$ 和 $2.86^{+1.08}_{-1.02}$，计算得到的激波的马赫数分别为 M_{ρ}=$1.91^{+0.16}_{-0.09}$ 和 M_{T}=$2.54^{+0.67}_{-0.63}$；在这个激波相反的位置上也存在一个激波，激波的马赫数分别为 M_{ρ}=$1.36^{+0.02}_{-0.02}$ 和 M_{T}=$1.33^{+0.17}_{-0.20}$。在星系团的东侧和北侧，也发现有两个冷锋存在，距离各自冷核中心为 27 kpc 和 12 kpc，冷锋所造成的电子密度跳变比分别为 $1.23^{+0.017}_{-0.002}$ 和 $2.21^{+0.08}_{-0.11}$。综合以上结果，可以推断，这个星系团东侧和北侧各存在一个并合事件。

关　键　词： 并合星系团；X 射线；激波；冷锋

中图分类号： P157.8　　　**文献标识码：** A

1　引　言

作为宇宙中最大的自引力束缚体，我们通常认为，星系团是通过次级星系团不断地并合而形成的。星系团的并合是宇宙大爆炸以来最激烈的天文事件，大约有 10^{57} J 的能量被释放，这些释放的能量会被传递进星系团内介质 (intercluster medium, ICM) 中，产生激波和湍流并加速其中的粒子。星系团的并合能够为我们研究 ICM 的物理，例如热传导、粘度、暗物质的自相互作用、粒子加速等，提供很多帮助[1]。

星系团并合的过程中，可以观测到两种子结构，冷锋 (cold front, CF) 和激波 (shock front, SF)，其中最典型的例子就是子弹星系团[1]。受这两种子结构的影响，星系团内的电子

收稿日期： 2021-10-26；　**修回日期：** 2021-11-30

资助项目： 国家自然科学基金重点项目 (11633001)；中国科学院战略性先导科技专项 (B类) (XDB23000000)；北京师范大学学科交叉建设项目基金

通讯作者： 王帅，201821160015@mail.bnu.edu.cn

密度产生变化，在 X 射线观测中，这种变化就会以 ICM 的表面亮度轮廓不连续的形式表现出来。星系团在并合时，次星系团会被向主星系团下落过程中产生的冲压剥离。Ascasibar 和 Markevitch[2] 通过模拟得出，次星系团的气体是否能被完全剥离取决于势阱的深浅、下落的速度以及气体的密度。若气体没有被完全剥离，次星系团的冷核与主星系团的高温 ICM 的交界处就会有冷锋产生；倘若被完全剥离，也就不会有冷锋出现。在并合星系团的 X 射线观测中，冷锋是最常见的特征，甚至会在一个并合星系团中出现多个冷锋[3]。冷锋不仅出现在并合星系团中，在弛豫星系团中也比较常见[3]，比如 RX J1720.1+2638[4]。研究表明，弛豫星系团中的冷锋主要由气体的晃荡所造成[5]。无论是哪一种冷锋，都会造成 X 射线表面亮度的不连续性。除此之外，冷锋还有另一个重要的特征就是温度跳变。在冷锋前，ICM 的温度较高，而在冷锋后温度偏低[1]。冷锋是我们研究星系团的一个重要手段，Vikhlinin 等人[6] 利用 Kelvin-Helmholtz 不稳定性研究星系团的磁场。通过模拟研究表明，冷锋对于磁场和热传导的研究有非常重要的意义[1, 7–9]。

模拟显示，大部分星系团的并合会产生激波，激波产生的温度跳变与冷锋相反，激波前的 ICM 温度低于激波后的温度。一般而言，激波的运动速度小于 3 倍的当地声速，即 3 马赫[1]。现如今，有相当一部分数量的激波已经被观测到，大部分的运动速度在 $1\sim2$ 马赫之间，而接近 3 马赫的则屈指可数。除此之外，在 X 射线波段观测到的具有两个相反激波的星系团更加稀少。相比于模拟数据，激波的观测数据还是相对较少的[3]。主要原因有三个：首先，在进行观测时，激波有可能已经运动到了星系团的外围，在 X 射线的图像上很难辨别出 ICM 表面亮度轮廓的不连续；其次，由于投影效应的影响，如果星系团的并合不是发生在天球平面上，ICM 的表面亮度轮廓的不连续性就会被隐藏得很好；最后，由于激波的速度小于 3 马赫，它造成的温度跳变相对较小[1]。这使得我们对于激波观测有了较大的困难。作为另一个研究并合星系团的重要手段，激波是我们研究星系团动力学[10]、暗物质[1, 11] 以及等离子体物理[6] 等领域非常重要的工具。

虽然冷锋和激波都可以产生表面亮度的跳变，但是两者的性质极不相同。除了前面提到的激波和冷锋对 ICM 气体温度的影响不同以外，它们对气体压强和熵值的影响也存在很大的差异。在激波前后，气体的压强有一个很大的跳变，但是在冷锋前后，压强几乎是连续变化的。而对于气体的熵值而言则正相反，激波前后的气体熵值变化很小，但是冷锋前后的熵值急剧变化[12]。Botteon 等人[13] 选取了 33 个非冷核星系团并对子结构进行了分析，利用图像的方式直观地表现出冷锋和激波前后物理量的变化，与上述基本相符。

本文的研究对象 Abell 4067 (A4067)，也被称作 RXCJ2359.3-6042，是一个红移为 0.099 2 的并合星系团。Chon 和 Bohringer 在 2015 年曾对 XMM 牛顿 X 射线卫星的观测数据进行光谱分析，并且得出并合的动力学过程，他们认为，次星系团是沿着主星系团西南-东北的方向进行并合，产生的激波加热了东侧的 ICM 气体，被冲压剥离的气体与主星系团弥散的 ICM 混合形成了一段比较亮的轨迹[14]。对此图像进一步分析，我们认为在星系团的北侧可能还存在一个并合事件，并且在北侧和西侧各存在一个潜在的激波结构[15]。

在本文中，我们使用了钱德拉 X 射线卫星的观测数据，借助它 $0.5''$ 的空间分辨率，可以对星系团内部的冷锋和激波结构进行更精确的分析。本文第 2 章会简述数据来源及图像的

处理方法，在第 3 章处理数据并得到结果，第 4 章中简要分析数据结果并对星系团的并合过程进行推测，第 5 章进行总结以及后续的工作展望。全文使用了 WMAP 标准宇宙学模型，宇宙学参数 $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $H_0 = 70\ \mathrm{km{\cdot}s^{-1}{\cdot}Mpc^{-1}}$，红移 $z = 0.099\,2$，图像上每角秒代表 1.83 kpc，误差均在 1σ 之内。

2 数据及处理

我们使用的数据来源于钱德拉 X 射线卫星，观测数据如表 1 所示。按照 Ge 等人[16]的处理步骤，我们利用 CIAO-4.11 和 CALDB-4.9.1 对上述数据进行了处理。首先使用 VFAINT 模式下的 chandra_repro 脚本对数据进行了再处理，然后使用 deflare 和 wav-detect 脚本分别去除了图像中的耀变和点源。对于数据的背景，我们首先用 9.5 ~ 12 keV 能段的计数率对钱德拉望远镜内置背景进行了归一化处理，将其作为仪器背景；对于宇宙 X 射线背景 (CXB)，我们则采用了三个成分进行模拟：一个非吸收的热辐射谱 ($kT = 0.1$ keV)、一个吸收的热辐射谱 ($kT = 0.25$ keV) 和一个吸收的幂律谱 ($\Gamma = 1.46$)，之后又抽取了 A4067 周围 $1^\circ \sim 2^\circ$ 圆环内的 ROSAT All-Sky Survey (RASS) 光谱作为天光背景，进行联合拟合来进一步限制 CXB。光谱的拟合使用了 XSPEC12.11.0 软件，银河的 HI 柱密度设定为 $N_\mathrm{H} = 1.41 \times 10^{20}\ \mathrm{cm^{-2}}$。

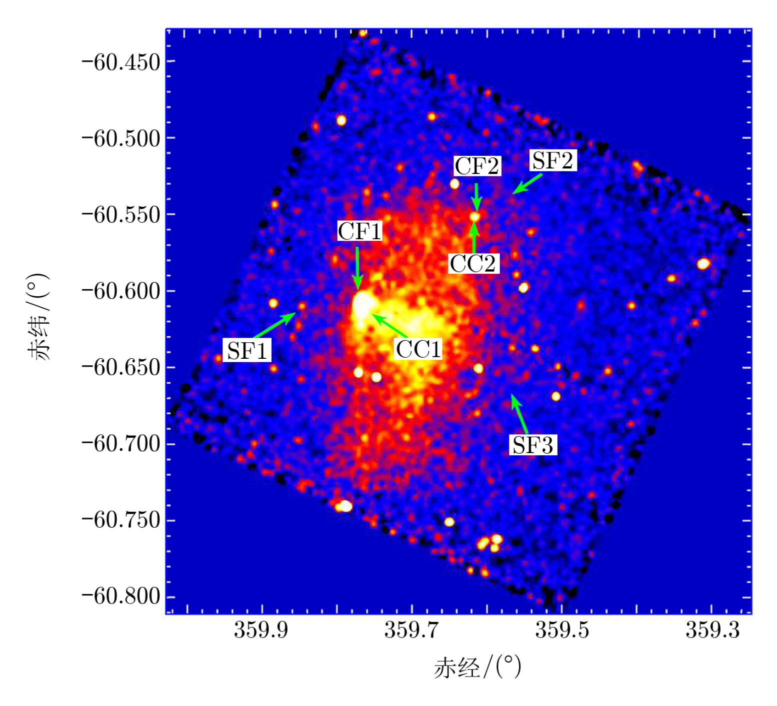
表 1　Chandra 卫星观测数据

观测编号	R.A. (J2000)	Dec (J2000)	曝光时间/ks	有效曝光时间/ks
20530	+23:58:38.60	−60:37:32.90	30.65	27.76
22123	+23:58:38.60	−60:37:32.90	39.55	35.95
22124	+23:58:38.60	−60:37:32.90	41.51	38.62
22125	+23:58:38.60	−60:37:32.90	17.82	17.05

3 结　果

我们将 4 次观测数据合并，裁减掉仪器背景后得到曝光修正后的图像。图 1 展示的便是以 12 像素为单位平滑后的曝光修正图，能段在 0.7 ~ 2 keV。由于星系团正处于并合过程中，所以 ICM 比较弥散。

我们认为，在这个星系团中正在发生着两个并合事件。第一个并合事件发生在西南-东北方向上，次星系团的冷核 (图 1 中的 CC1) 亮度比较高，气体由于被冲压剥离而在后方形成了一段比较明显的轨迹。不难看出，在冷核附近，表面亮度在沿并合方向上存在一次急剧的下降 (图 1 中的 CF1)，在大约 100″ 处存在第二次下降 (图 1 中的 SF1)。除此之外，在星系团的北侧正发生着第二个并合事件，发生的方向为由南向北，相对于 CC1，这个次星系团的冷核 (图 1 中的 CC2) 比较小且亮度也比较低，在并合的方向上也存在两次表面亮度的下降 (分别是图 1 中的 CF2 和 SF2)，但是 SF2 处的下降并不是那么明显。最后我们注意



注：以 12 像素为单位平滑后的 Abell 4067 曝光修正图，图中的 SF 与 CF 指的是可能的激波与冷锋，CC 代表冷核。

图 1　A4067 图像

到，在星系团的西侧也存在一次表面亮度的急剧下降，我们猜测这或许也是一个激波结构 (图 1 中的 SF3)。我们主要关注北侧的冷锋、激波和西侧的激波结构，对它们进行初步分析认证。

3.1　表面亮度轮廓

星系团内的电子密度分布会由于激波和冷锋的影响发生变化，这就使得在激波和冷锋前后，星系团的表面亮度轮廓有不连续性，这是我们判断激波和冷锋位置的主要依据。

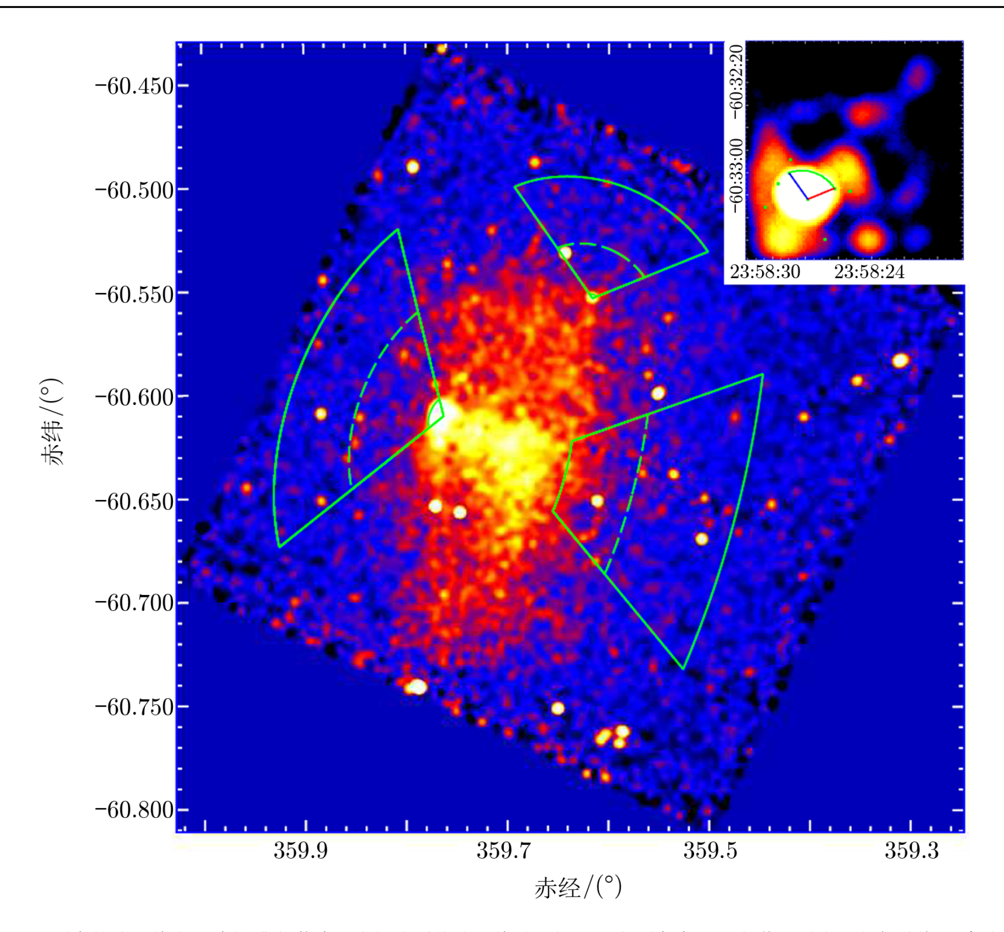
通过对图像的初步分析，我们按照图 2 的方式对星系团划分了区域 (东侧、西侧、北侧)，并分别从这三个区域提取了可能的激波或冷锋前后的表面亮度，图 2 右上角是将北侧冷核放大后的图像以及表面亮度的提取范围。使用椭球模型[17]对数据进行拟合。在这个模型下，星系团 X 射线的发射率会在冷锋或激波前后表现出不同的发射规律：

$$\epsilon(r)=\begin{cases}\epsilon_{\rm i}(r/r_{\rm edge})^{-2p_{\rm i}}\ , & r<r_{\rm edge}\\ \epsilon_{\rm o}(r/r_{\rm edge})^{-2p_{\rm o}}\ , & r>r_{\rm edge}\end{cases}\ , \tag{1}$$

其中，$r_{\rm edge}$ 代表冷锋或者激波的位置。此时，X 射线表面亮度就由以下公式给出：

$$I_{\rm X}(r)=I_{\rm in}(r)+I_{\rm out}(r)\quad , \tag{2}$$

其中，$I_{\rm in}(r)$ 和 $I_{\rm out}(r)$ 分别为：



注：图中的分界线表示冷锋或者激波，我们分别从分界线前后提取了表面亮度以及光谱。图片右上角是将星系团北侧冷核放大后的图像，以及冷锋内侧表面亮度的提取范围。

图 2 表面亮度与光谱的提取区域

$$I_{\rm in}(r) = I_{\rm i} A^{-2p_{\rm i}+1} \begin{cases} 1 - I_{A^2}(p_{\rm i} - 0.5, 0.5) \ , & A^2 < 1 \\ 0 \ , & A^2 \geqslant 1 \end{cases} \ , \tag{3}$$

和

$$I_{\rm out}(r) = I_{\rm o} A^{-2p_{\rm o}+1} \begin{cases} I_{A^2}(p_{\rm o} - 0.5, 0.5) \ , & A^2 < 1 \\ 1 \ , & A^2 \geqslant 1 \end{cases} \ . \tag{4}$$

式 (3) 和 (4) 中，$A = (r/r_{\rm edge})$，$I_{A^2}(a, b)$ 是归一化的不完全 β 函数。通过

$$I_{\rm i} = R I_{\rm o} \frac{B(p_{\rm i} - 0.5, 0.5)}{B(p_{\rm o} - 0.5, 0.5)} \ , \tag{5}$$

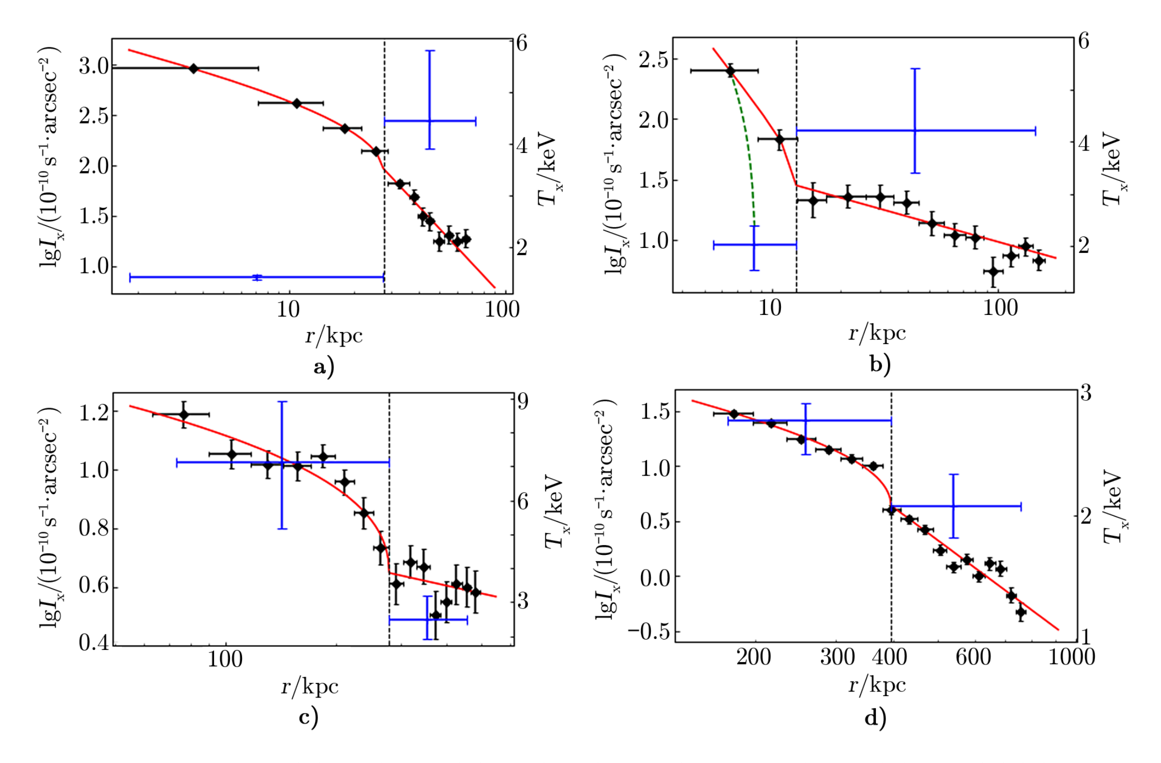
我们可以计算出 R，也就是激波或者冷锋前后，气体面亮度的跳变比，其中 B 为 β 函数。

再利用

$$M^2 = \frac{3C}{4-C} \quad , \tag{6}$$

我们就可以计算出激波运动的马赫数，其中，$C=\sqrt{R}$，为电子密度的跳变比[18]。

图 3 展示了对各个区域表面亮度轮廓拟合的结果，利用上述的模型，我们分别提取并拟合了东侧 CF1 (图 3 a)) 和SF1 (图 3 c)) 前后、北侧 CF2 (图 3 b)) 前后和西侧 SF3 (图 3 d)) 前后的表面亮度，黑色的点是从 X 射线图像中提取的表面亮度，红线是对表面亮度拟合的结果，主要的拟合参数由表 2 给出。根据拟合的结果，我们可以直接观测到表面亮度跳变的区域，在图像中以黑色的虚线所示，由此可以判断出冷锋或者激波的位置及表面亮度的跳变比。CF1 在离 CC1 中心大约 28 kpc 处，面亮度的跳变比为 $1.52^{+0.042}_{-0.006}$。SF1 和 SF3 在距离中心大约 280 kpc 和 395 kpc 处，面亮度跳变比分别为 $4.83^{+0.73}_{-0.41}$ 和 $2.33^{+0.095}_{-0.106}$。图 3 b) 中的绿线是 Chandra 点源的 PSF，通过与 CF2 后的表面亮度轮廓相比，我们认为 CC2 是冷核而非点源。CF2 在距离 CC2 中心大约 13 kpc，面亮度跳变比为 $4.91^{+0.37}_{-0.53}$。我们也提取了 SF2 处的表面亮度，如图 4 所示，却不能很好地进行拟合。值得一提的是，我们对表面亮度轮廓的拟合只能判断出冷锋或者激波的位置，但是却没法判断出它的具体类型，之后需要进行光谱拟合确定温度后做进一步的判断。



注：黑点是提取的表面亮度，红线是表面亮度拟合结果，蓝点是温度的光谱拟合结果，黑虚线是表面亮度产生跳变的区域。a) 为东侧 CF1 前后表面亮度轮廓拟合及温度拟合结果；b) 为北侧 CF2 拟合结果，其中绿虚线是 Chandra 点源的 PSF 图线；c) 为东侧 SF1 拟合结果；d) 为西侧 SF3 拟合结果。

图 3　表面亮度轮廓拟合及温度拟合结果

表 2 激波与冷锋的性质

编号	R	T_2	T_1	T_2/T_1	M_ρ	M_T
CF1	$1.52^{+0.042}_{-0.006}$	$1.43^{+0.05}_{-0.04}$	$4.44^{+1.38}_{-0.52}$	$0.32^{+0.10}_{-0.03}$	—	—
CF2	$4.91^{+0.37}_{-0.53}$	$2.02^{+0.37}_{-0.48}$	$4.21^{+1.19}_{-0.80}$	$0.479^{+0.16}_{-0.14}$	—	—
SF1	$4.83^{+0.73}_{-0.41}$	$7.13^{+1.80}_{-1.96}$	$2.49^{+0.7}_{-0.56}$	$2.86^{+1.08}_{-1.02}$	$1.91^{+0.16}_{-0.09}$	$2.54^{+0.67}_{-0.63}$
SF3	$2.33^{+0.095}_{-0.106}$	$2.75^{+0.141}_{-0.268}$	$2.07^{+0.257}_{-0.243}$	$1.32^{+0.17}_{-0.20}$	$1.36^{+0.02}_{-0.02}$	$1.33^{+0.17}_{-0.20}$

注：R 为面亮度的跳变比，T_2 为冷锋或者激波后的温度，T_1 为冷锋或者激波前的温度，T_2/T_1 为温度的跳变比，M_ρ 是利用电子密度跳变求出的激波运动的马赫数，M_T 是利用温度跳变求出的激波运动的马赫数。

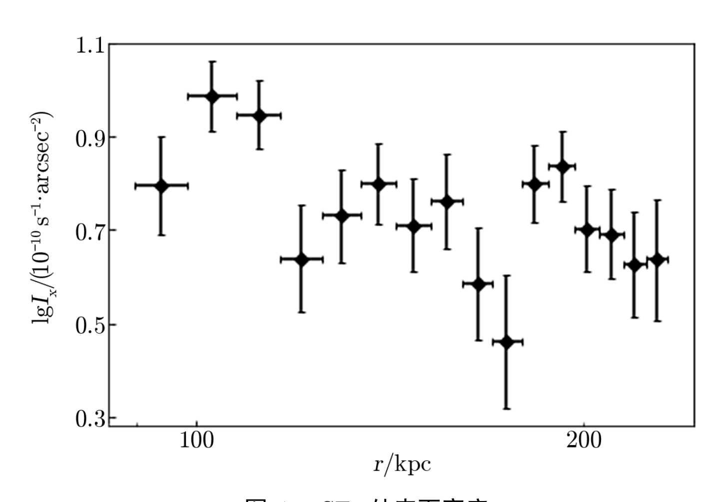


图 4 SF2 处表面亮度

3.2 光谱分析

在并合星系团中，冷锋主要是由次星系团的冷核进入到主星系团的高温 ICM 中产生的，所以锋前的温度往往高于锋后；而激波则正好相反，由于激波前进会加热扫过的 ICM，因此波前的温度往往会低于波后，这是我们区分两种结构的主要依据。

根据 3.1 节表面亮度轮廓的结果，我们抽取了 SF 和 CF 前后的光谱，用 tbabs*apec 模型对光谱进行拟合，得到各个区域的温度，温度的拟合结果在图 3 中用蓝色的点展示，具体的拟合参数在表 2 中给出。ICM 在经过 CF1 和 CF2 时温度升高，而在经过 SF1 和 SF3 时温度降低，由此我们可以判断 CF1 和 CF2 是冷锋，SF1 和 SF3 是激波。 利用公式：

$$M^2 = \frac{1}{5}\left(8\frac{T_2}{T_1} - 7\right) + \frac{1}{5}\left[\left(8\frac{T_2}{T_1} - 7\right)^2 + 15\right]^{\frac{1}{2}} \quad , \tag{7}$$

可以通过温度的跳变计算激波的速度，其中 T_1 和 T_2 分别代表激波前后的温度[18]。根据表面亮度轮廓和光谱的拟合结果，我们在判断出激波位置的同时也计算出激波运动的马赫数，SF1 的马赫数为 M_ρ=$1.91^{+0.16}_{-0.09}$ 和 M_T=$2.54^{+0.67}_{-0.63}$，SF3 的马赫数为 M_ρ=$1.36^{+0.02}_{-0.02}$ 和 M_T=$1.33^{+0.17}_{-0.20}$，其中，M_ρ 和 M_T 分别为使用表面亮度跳变比和温度跳变比计算的马赫数。

4 结 论

通过第 3 章的拟合与计算，我们确认，在星系团的东侧确实发生着一次并合，并且在星系团的东侧产生了一个激波结构，这与 Chon 等人之前的工作相吻合。在此基础上，我们通过使用 Chandra 数据进一步发现，星系团西侧确实也存在激波结构。我们推测这两个激波应该来自于同一次并合，可能是并合事件发生时产生的一个反向激波。并合过程中，次星系团的气体被冲压剥离，与主星系团的 ICM 混合形成了一道轨迹。除此之外，我们还发现星系团北侧的区域有冷锋的存在，但是激波结构却没有得到验证。尽管如此，我们还是更倾向于这里存在着并合事件，之所以不能很好地判断激波结构，可能有两个原因：(1) 这里很靠近星系团的外围，ICM 过于弥散，对于 X 射线的探测比较困难；(2) 这里 ICM 运动的速度小于当地声速，不足以形成激波。

5 总结与展望

我们利用钱德拉 X 射线卫星的数据对 Abell4067 星系团内部的子结构进行了较细致的分析。我们证实，在星系团东侧发生一次并合事件，并在 Chon 等人的工作基础上，进一步发现这个并合事件产生了两个相反的激波结构。 我们也发现在星系团的北侧确实存在一个冷锋，结合 X 射线的观测数据，我们推测北侧还可能存在着一次并合，但受数据质量的影响，没有办法找到更有力的证据证明北侧激波的存在。 想要进一步验证这个推断，更长时间的观测是有必要的，除此之外，也可以通过与其他波段的数据结合进行更加严谨的研究分析。比如在光学波段，如果能够证明星系团存在不同的星系成分，也可以帮助我们判断是否有并合事件发生。

参考文献：

[1] Markevitch M, Vikhlinin A. PR, 2007, 443: 1
[2] Ascasibar Y, Markevitch M. ApJ, 2006, 650: 102
[3] Pascut A, Hughes J P. ApJ, 2019, 874: 71
[4] Mazzotta P, Markevitch M, Vikhlinin A, et al. ApJ, 2001, 555: 205
[5] Ghizzardi S, Possetti M, Molendi S. A&A, 2010, 516: A32
[6] Vikhlinin A, Markevitch M, Murray S S. ApJ, 2001, 551: 160
[7] Zuhone J A, Roediger E. Journal of Plasma Physics, 2016, 82: 48
[8] Zuhone J A, Markevitch M, Ruszkowski M, et al. ApJ, 2013, 762: 69
[9] Xiang F, Churazov E, Dolag K, et al. MNRAS, 2007, 379: 1325
[10] Markevitch M, Govoni F, Brunetti G, et al. ApJ, 2005, 627: 733
[11] Molnar S. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2016, 2: 7
[12] Markevitch M, Gonzalez A H, David L, et al. ApJ, 2002, 567: L27
[13] Botteon A, Gastaldello F, Brunetti G. MNRAS, 2018, 476: 5591

[14] Chon G, Bohringer H. A&A, 2015, 574: A132
[15] Ge C. Chandra proposal ID #19800185, 2017
[16] Ge C, Liu R Y, Sun M, et al. MNRAS, 2020, 497: 4704
[17] Korngut P M, Dicker S R, Reese E D, et al. ApJ, 2011, 734: 17
[18] Sarazin, Finoguenov A, Wik D, et al. 2016, arXiv: 1606.07433

The Study of Properties of Shocks and Cold Fronts in Abell 4067

WANG Shuai[1], GE Chong[2]

(1. The Astronomy Department, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Purple Mountain Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

Abstract: Merging cluster is an ideal laboratory in the universe. Both shock fronts and cold fronts play the important roles in the merging process, which provide novel tools to study the cluster and ICM physics. Deep (130 ks) Chandra observation of Abell 4067 have given us much information of the substructures in this merging galaxy cluster. It gave us more chances to study the details during the cluster merging. By analysing the surface brightness profiles and fitting the spectrum, the properties of the shocks and cold fronts were revealed. This deep observation confirmed a shock fronts on the east, with the density jump factor of $2.19^{+0.16}_{-0.09}$ and the temperature jump factor of $2.86^{+1.08}_{-1.02}$. In two different methods, We get the Mach numbers M_ρ=$1.91^{+0.16}_{-0.09}$ and M_T=$2.54^{+0.67}_{-0.63}$, respectively. On the west, we find another shock fronts which is opposite to the eastern one, with the Mach numbers M_ρ=$1.36^{+0.02}_{-0.02}$ and M_T=$1.33^{+0.17}_{-0.20}$. Besides, we also find two cold fronts on the east and north. The density across the cold fronts jumps by a factor of $1.23^{+0.017}_{-0.002}$ and $2.21^{+0.08}_{-0.11}$, respectively. We infer that there were two merge events in this galaxy clusters on the east and north. To identify the shock front on the north, much deeper observation is needed. Besides, it is also helpful to combine the multi-wave observation data.

Key words: merging galaxy cluster; X-ray; shock fronts; cold front